УДК 536.46

О МЕХАНИЗМЕ ЛОКАЛЬНОЙ ЭРОЗИИ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОВОГО ТРАКТА КОТЛОВ ЧАСТИЦАМИ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ

Г.В. Кузнецов, Г.В. Таратушкина*

Томский политехнический университет
E-mail: login@ped.tpu.ru
**НИИ прикладной математики и механики при Томском госуниверситете

Представлены результаты теоретического исследования процесса теплопереноса при выпадении на поверхность элементов конструкции газового тракта котлов частиц летучей золы и результаты численного анализа уровня термических напряжений, возникающих в тонком приповерхностном слое металла в малой окрестности частицы. Задача решена методом конечных разностей. Установлено, что значения упругих напряжений, возникающих в тонком, прилегающем к поверхности нагрева слое металла, достаточно велики. Возможна реализация механизма локальной эрозии металла элементов газового тракта котлов за счет растрескивания поверхности с образованием сетки мелких трещин, как в радиальном так и в окружном направлениях, даже при инерционном осаждении частиц золы с малыми скоростями движения.

Известно, что работа современных котельных агрегатов сопровождается сложными, взаимосвязанными физическими и химическими процессами в тракте дымовых газов [1]. Эти процессы оказывают сильное влияние на работоспособность металла, из которого изготовлены узлы и детали котельного оборудования [1–3]. Наиболее часто неполадки и повреждения происходят на водяных экономайзерах, топочных экранах, пароперегревателях [2]. Износ поверхности труб экономайзеров принято считать [2] следствием ударов частиц летучей золы о поверхность труб. Для снижения масштабов эрозии металла труб вводятся ограничения на скорости движения дымовых газов. Но при малых скоростях дымовых газов возникают золовые заносы, вызывающие рост сопротивления и ухудшение теплообмена [1, 2].

В то же время детальный механизм эрозии металлов в рассматриваемых условиях котельного оборудования до настоящего времени не установлен однозначно. В данной работе проведен теоретический анализ условий реализации одного из возможных механизмов эрозии металла элементов конструкции тракта дымовых газов, например, трубной доски воздухонагревателя.

Рассматривается механизм эрозии металла, являющийся следствием не ударов частиц летучей золы, движущихся с большой скоростью под определенными углами атаки по отношению к поверхности доски, а следствием инерционного осаждения таких частиц с малой скоростью на поверхность элементов газового тракта. Частицы золы всегда имеют существенно более высокую температуру, чем, теплообменная поверхность, которая охлаждается за счёт отвода тепла из приповерхностных "горячих" слоёв металла в глубинные слои, имеющие всегда относительно низкую температуру. При попадании частиц, нагретых до температур на несколько сотен градусов выше, чем поверхность, на которую частица осаждается, в тонком приповерхностном слое металла возникают термические напряжения, обусловленные градиентами температуры вблизи поверхности нагрева. Эти напряжения возникают в малой окрестности частицы и не приводили бы к значительным деформациям металла, если бы случаи осаждения частиц были единичны. В реальных же условиях при любых скоростях движения дымовых газов выпадения частиц происходят непрерывно. Затем зола может уноситься потоком или оставаться на поверхности элемента газового тракта. При этом одиночный случай осаждения частицы в определенных условиях может приводить лишь к возникновению одиночных локальных микротрещин, но частые последовательные повторения влекут за собой разрушение металла в результате его малоцикловой усталости [4].

Цель данной работы – теоретический анализ полей температур и упругих напряжений в окрестности нагретой до высоких температур частицы летучей золы, выпавшей на поверхность металла.

Постановка задачи

При решении задачи предполагалось, что частица имеет форму цилиндра малой высоты. Задача решалась в цилиндрической системе координат, начало которой совпадало с точкой пересечения оси симметрии и внешней границы частицы. Была принята следующая схема процесса. Частица выпадает на поверхность пластины металла с начальной температурой T_0 из дымовых газов с температурой $T_г$ (при этом $T_0<T_г$). В пластине выделяется цилиндр, характерная высота которого H и радиус r_2 много больше соответственно высоты и радиального размера частицы. Параметры внешнего газового потока (коэффициент теплоотдачи и $T_г$) известны и постоянны на всех границах частицы и металла в любой момент времени. Предполагалось, что теплообмен между высокотемпературной средой и частицей (а также между средой и металлом) осуществляется за счет конвекции и излучения.

Приняты следующие основные допущения, не накладывающие серьезных ограничений на общность постановки задачи.

1. Форма частицы после осаждения не изменяется. Для частиц золы, находящихся в момент осаждения в твердом состоянии и имеющих относительно невысокие скорости движения, такое допущение является обоснованным.
2. Теплообмен между частицей и металлом осуществляется в условиях идеального контакта.
3. Прилегающий к поверхности слой металла находится в твердом состоянии, и после выпадения частицы не происходит деформации этой поверхности.
4. Условия теплообмена на всей поверхности частицы и поверхности металла, остающейся открытой, принимаются адекватными.
5. Теплофизические свойства материала частицы и металла не зависят от температуры.
6. Не учитываются возможные химические реакции между частицей и металлом.

Математическая модель

Система нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности для системы "частица – металл" (рис. 1), соответствующая сформулированной физической модели имеет следующий вид:

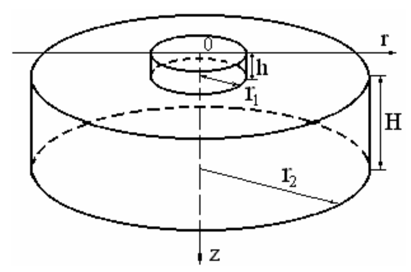


Рис. 1. *Схема области решения задачи*

$$c_1\rho_1\frac{\partial T_1}{\partial t}=\lambda_1\left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T_1}{\partial r}+\frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2}\right),$$

$$0\le r\le r_1,\ 0\le z\le h, \qquad (1)$$

$$c_2\rho_2\frac{\partial T_2}{\partial t}=\lambda_2\left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T_2}{\partial r}+\frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}\right),$$

$$0\le r\le r_2,\ h\le z\le h+H. \qquad (2)$$

При постановке задачи принято, что оси симметрии частицы и выделяемого в пластине металла цилиндра совпадают. Граничные и начальные условия для сформулированной задачи имеют вид:

$$z=h,\ r_1\le r\le r_2$$

$$-\lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial z}=\alpha(T_г-T_2)+\sigma\varepsilon_{пр}(T_г^4-T_2^4), \qquad (3)$$

$$z=H+h,\ 0\le r\le r_2,\ \ -\lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial z}=0, \qquad (4)$$

$$h\le z\le H+h,\ r=0,\ \ -\lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial r}=0, \qquad (5)$$

$$h\le z\le H+h,\ r=r_2,\ \ -\lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial r}=0, \qquad (6)$$

$$z=h,\ 0\le r\le r_1\ \ -\lambda_1\frac{\partial T_1}{\partial z}=\lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial z},\ \ T_1=T_2, \qquad (7)$$

$$z=0,\ 0\le r\le r_1$$

$$-\lambda_1\frac{\partial T_1}{\partial z}=\alpha(T_г-T)+\sigma\varepsilon_{пр}(T_г^4-T_1^4), \qquad (8)$$

$$0\le z\le h,\ r=0,\ \ -\lambda_1\frac{\partial T_1}{\partial r}=0, \qquad (9)$$

$$0\le z\le h,\ r=r_1$$

$$-\lambda_1\frac{\partial T_1}{\partial r}=\alpha(T_г-T_1)+\sigma\varepsilon_{пр}(T_г^4-T_1^4), \qquad (10)$$

$$t=0,\ T_1(r,z)=T_{10},\ \ T_2(r,z)=T_0. \qquad (11)$$

Значения тангенциальных σ_t и радиальных σ_r термических напряжений в приповерхностном слое металла рассчитывались по приближенным выражениям [5], полученным для условий воздействия на поверхность пластины теплового источника заданной интенсивности радиусом r_1.

$$\sigma_r=-[(2E\beta(T-T_0)(r_1/r)^3]/3(1-\mu),\quad r>r_1, \qquad (12)$$

$$\sigma_\tau=[(E\beta(T-T_0)(r_1/r)^3]/3(1-\mu),\quad r>r_1, \qquad (13)$$

$$\sigma_r=\sigma_\tau=-[(2E\beta(T-T_0)]/3(1-\mu),\quad r<r_1. \qquad (14)$$

Здесь E – модуль упругости: β – температурный коэффициент линейного расширения: μ – коэффициент Пуассона.

Метод решения

Сформулированная система дифференциальных уравнений с соответствующими краевыми и начальными условиями (1–14) решена методом конечных разностей [6]. Для решения разностных аналогов двумерных уравнений использовался локально-одномерный метод в сочетании с методом итераций. Одномерные разностные уравнения решены методом прогонки с использованием неявной четырехточечной разностной схемы [6]. Сеточные параметры выбирались таким образом, чтобы для частиц любого размера обеспечить не менее 50 узлов разностной сетки по каждой координате.

Численные исследования проведены при следующих значениях параметров и постоянных [7, 8]: $T_г$=1000 К; T_0=400, 500, 600, 700 К; α=200, 500, 1000 Вт/м^2·К; h=50, 100, 150, 200 мкм; T_{10}=1000 К; λ_2=46 Вт/м·К; c_2=500 Дж/кг·К; ρ_2=7800 кг/м^3; λ_1=1,5 Вт/м·К; c_1=1100 Дж/кг·К; ρ_1=1700 м/м^3; E=2·10^{11}Па: β=15·10^{-6} 1/К; μ= 0,5.

Основные расчеты проведены для частиц, высота которых равна диаметру. Такое соотношение продольного и поперечного размеров характерно для частиц, образующихся при сгорании типичных углей.

Результаты численных исследований и обсуждение

На рис. 2 приведены типичные результаты расчетов в виде зависимости температуры зоны контакта $T_к = T(0,h,t)$ на оси симметрии от времени для частиц золы разного диаметра. На этом же рисунке приведена зависимость температуры поверхности металла $T_п$ от времени в условиях отсутствия частиц при адекватных условиях теплообмена. Видно, что выпадение частиц в условиях идеального теплового контакта приводит к скачкообразному росту $T_к$ от начального значения T_0 = 400 К до величины ≈700 К (при $T_г$ = 1000 К). Затем, с ростом t значение $T_к$ уменьшается. Также хорошо видно, что уменьшение размеров частицы приводит к существенному снижению величины $T_к$ в каждый момент времени. Этот результат обусловлен, скорее всего, различным теплосодержанием частиц в момент выпадения. Мелкие частицы "остывают" быстрее крупных, отдавая тепло в металл, и одновременно закрывая участок поверхности, (приближенно равный по площади поперечному сечению частицы), от воздействия внешней высокотемпературной среды.

Зависимости температуры поверхности частицы золы в точке с координатами z = 0 и r = 0 от времени $T_1 = T(0,0,t)$ приведены на рис. 3 также для их разных характерных размеров. Видно, что перепад температур по частице на расстоянии h значителен для частиц любого размера (от 100 до 700 К). При этом $T_1(0,0,t)$ при h = 50 мкм за 2 мс падает от начального значения 700 до 400 К. Температура же крупных частиц $T_1(0,0,t)$ за этот же промежуток времени даже растет почти на 100 К. Данный результат дает основание сделать вывод о том, что мелкие частицы играют в большей степени роль теплоизолятора, чем источника нагрева. Большие же нагревают металл.

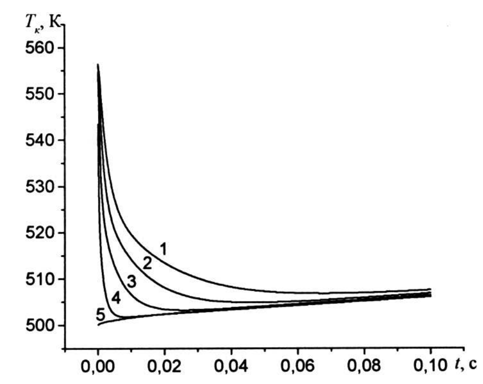


Рис. 2. *Зависимости температуры зоны контакта $T_к$=T(0,h,t) на оси симметрии от времени для частиц золы разного диаметра r_1 при T_0=500 К: 1) 200; 2) 150; 3) 100; 4) 50 мкм; 5) граничные условия 1-го рода*

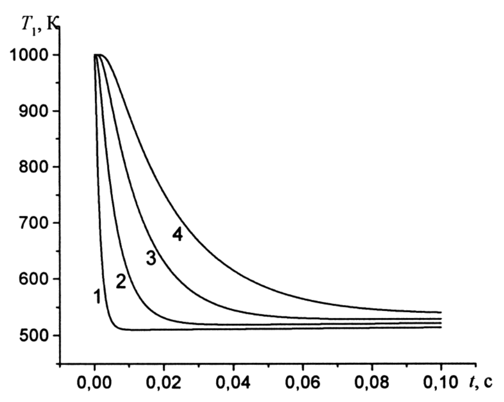


Рис. 3. *Зависимости температуры поверхности частицы золы T_1=T(0,0,t) от времени при T_0=500 К для их разных характерных размеров r_1: 1) 50; 2) 100; 3) 150; 4) 200 мкм*

Установлено также, что пятикратное увеличение α приводит к очень незначительным (не более 3 %) изменениям значений $T_к$ и $T_1(0,0,t)$ во всем диапазоне изменения времени. К аналогичным результатам приводит и увеличение температуры внешней среды. Эти результаты позволяют сделать вывод, что масштабы влияния частиц на температуру зоны контакта определяются в начальный промежуток времени только параметрами самой частицы (теплофизические характеристики, размер) и почти не зависят от параметров внешнего высокотемпературного газового потока.

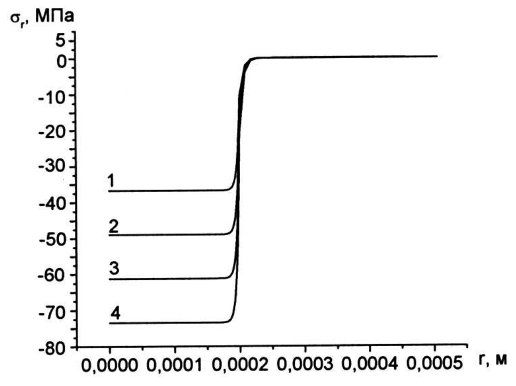


Рис. 4. *Радиальные термические напряжения σ_r, для стали при r_1=200 мк, где 1) 700; 2) 600; 3) 500; 4) 400 К*

На рис. 4 приведены типичные распределения по r радиальных напряжений σ_r в сечении $z = 0$. Видно, что численные значения σ_r достигают $7 \cdot 10^7$ Па. При этом величина напряжений растет с ростом перепада температур $\Delta T = T_ч - T_0$. Но даже при относительно малом перепаде ΔT ($T_ч$=700 К) величина σ_r достигает $3 \cdot 10^7$ Па. Проводя анализ полученных результатов, можно отметить, что полученные значения σ_r достаточно далеки при температурах 300...500 К от пределов прочности $\sigma_{пр}$ типичных углеродистых сталей. Но если учесть зависимость $\sigma_{пр}$ [9] от температуры (таблица), то можно сделать обоснованный вывод о том, что расчетные значения $\sigma_{пр}$ (рис. 4) и табличные величины $\sigma_{пр}$ (таблица) в диапазоне высоких температур достаточно близки. Соответственно, вероятность возникновения в тонком приповерхностном слое металла радиальных сжимающих напряжений, превышающих предел прочности металла при соответствующей температуре достаточно велика. При выполнении условия $\sigma_r = \sigma_{пр}$ возможно возникновение в нагретом слое трещин, ориентированных по радиальной координате.

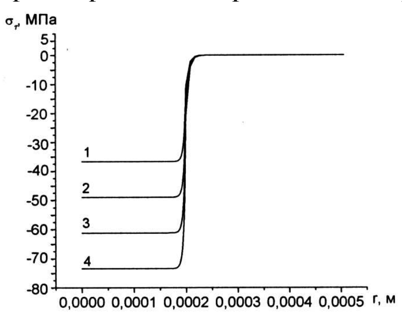


Рис. 5. *Тангенциальные термические напряжения σ_t, для стали, при r_1=200 мкм, где 1) 700; 2) 600; 3) 500; 4) 400 К*

Таблица. *Пределы прочности типичных сталей при высоких температурах, $\sigma_{пр}$, МПа*

Сталь	Температура, °С					
	20	200	300	400	500	600
10	430	425	525	380	260	110
20	480	440	450	360	220	130
45	640	700	730	575	385	220

Аналогичные распределения получены и для тангенциальных напряжений в прогретом слое (рис. 5). Можно сделать вывод о том, что в тонком приповерхностном слое стали, например трубной доски воздухонагревателя, возможно возникновение и окружных термических напряжений, сопоставимых по величине с пределом прочности стали при соответствующей температуре. Окружные напряжения могут приводить к возникновению сетки трещин (или одиночных трещин) ориентированных по окружной координате в малой области выпадения частиц золы. Вероятность реализации такого механизма эрозии металлов элементов котельного оборудования достаточно велика, потому что для типичных режимов работы разность температур дымовых газов (и соответственно частиц летучей золы) и поверхности элементов газового тракта составляет несколько сот градусов.

Необходимо отметить, что при проведении численного анализа были рассмотрены частицы золы размерами до 500 мкм. В настоящее время нет оснований говорить как о доминировании в продуктах сгорания угля частиц мелких фракций (с характерными размерами единицы мкм), так и о преобладании крупных частиц (с размерами до 200 мкм) [10]. Получение достоверных экспериментальных данных о массовой концентрации и распределении частиц по размерам в продуктах сгорания угля может создать предпосылки для более общих выводов о масштабах влияния частиц конденсированной фазы на закономерности процессов прогрева и эрозии металлов котельного оборудования.

Заключение

Численно исследовано локальное температурное поле в малой окрестности зоны контакта твердой, разогретой до высоких температур частицы, выпавшей на поверхность элемента конструкции котла из потока дымовых газов. Полученные результаты характеризуют не только возможный диапазон изменения температуры зоны контакта для различных условий теплообмена с внешней средой, материалов и размеров частиц. На основании полученной информации можно с достаточно высокой степенью надежности прогнозировать реальные режимы прогрева металла за счет передачи тепла нагретыми до высоких температур твердыми или жидкими частицами, которые при попадании на поверхность металла создают местные центры высоких температур.

Полученные результаты позволяют также сделать заключение о возможности реализации механизма локальной эрозии металла в газовых трактах котельного оборудования. Эрозия может быть обусловлена возникновением в тонком приповерхностном слое металла термических напряжений (сопоставимых по величине с пределами прочности данного металла при соответствующих температурах) за счет локального интенсивного прогрева металла выпавшей на поверхность элемента конструкции частицы летучей золы. Образование в результате реализации такого механизма сетки микротрещин на поверхности металла влечёт за собой ослабление прочности металла в тонком приповерхностном слое, прилегающем к поверхности нагрева, и последующее разрушение с уносом мелких частиц потоком дымовых газов.

Список обозначений

T – температура, К; c – удельная теплоемкость, Дж/кг·К; ρ – плотность, кг/м^3; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; t – время, с; r, z – цилиндрические координаты, м; h – высота частицы, м; H – высота цилиндра выделяемого в пластине металла, м; α – коэффициент теплообмена, Вт/м^2·К; σ – постоянная Стефана-Больцмана; $T_г$ – температура внешнего газового потока, К; $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты; T_0 – температура металла в начальный момент времени, К; $T_к$ – температура в зоне контакта на оси симметрии, К; $T_1(0,0,t)$ – температура поверхности частицы на оси симметрии, К; $T_п$ – температура поверхности конденсированного вещества без частицы, К. Индексы 1 и 2 соответствуют частице и металлу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов П.А. Предупреждение аварий паровых котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.
2. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС // Г.П. Гладышев, Р.З. Аминов, В.З. Гуревич и др.; Под ред. А.И. Андрющенко. – М.: Высшая школа, 1991. – 303 с.
3. Лебедев И.К. К вопросу о физической природе золового уноса в котельных установках // Известия Томского политехнического института. – 1952. – Т. 69. – С. 68–71.
4. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. – М.: Машиностроение, 1974. – 344 с.
5. Marscher W.D. Thermal Versas Mechanical Effects in High Speec // Wear 79. – 1982. – P. 129.
6. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
7. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. – М.: Мир, 1975. – 378 с.
8. Теплопроводность твердых тел: Справочник под ред. А.С. Охотина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.
9. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, П.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др. Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1072 с.
10. Жангаскин К.К., Когай Г.Н. Численный анализ эрозионного уноса при поперечном обтекании цилиндра газообразным потоком // Теплоэнергетика. – 1999. – № 4. – С. 57–59.

УДК 66.041.001.5:661.487